

液浸リソグラフィーにおける結像特性の考察

松山知行

A Study of the Imaging Properties of Immersion Lithography

Tomoyuki MATSUYAMA

Immersion lithography, which has capability to obtain high numerical aperture (NA) beyond 1, is one of the breakthrough technologies for further extension of optical microlithography. Immersion lithography has two advantages over dry lithography in terms of higher resolution and deeper depth of focus (DOF). One drawback for such high NA imaging is contrast degradation due to vector effect of interference. This drawback is recovered by using s-polarized light illumination. The advantage of immersion imaging and the effect of s-polarized light illumination are validated by actual experimental results. It is confirmed that the immersion lithography is the most promising technology for realization of the near future technology nodes.

Key words: optical microlithography, immersion lithography, polarized illumination, high numerical aperture

光リソグラフィーの新たな領域として、液浸露光装置の研究開発が、各露光装置メーカーを中心にさかんに行われている。液浸露光装置とは、液浸顕微鏡対物レンズのように、投影レンズ下面と結像面である基板との空間を液体（現状で実用性が確認できている媒質は純水）で満たすことで、像界の屈折率を大きくし、投影光学系の開口数（numerical aperture: NA）を上げようというものである。これにより NA が 1 を超える投影レンズを実現し、現状露光装置の次世代、あるいは次々世代の半導体開発への適用が可能になる。従来、極紫外リソグラフィー（extreme ultra violet lithography: EUVL）の領域と考えられていた、半周期 45 nm 以下の密集パターンの形成に、ArF エキシマレーザーを光源とする液浸露光装置が採用されることが期待されている¹⁾。また、液浸投影レンズでは、同じ開口数であっても、乾燥投影レンズに比べて、瞳最周辺を通る光線の光軸となす角度が小さくてすむので、高 NA レンズで懸念される焦点深度の低下を軽減する効果も期待できる。さらに、高 NA 結像におけるベクトル効果によるコントラスト低下は、直線偏光照明の採用で回避することが提案されている。本稿では、液浸結像に関する技術的トピックスについて報告する。

1. 液浸結像における解像力と焦点深度

投影レンズの解像力（resolution half pitch: R）は、いわゆる解像力の式、

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

により表現できる。ここで、 λ は露光波長、NA は開口数、 k_1 はプロセスファクターと呼ばれる定数である。これまで、解像力を向上させるために、露光装置メーカーは、露光波長の短波長化、投影レンズの高 NA 化に取り組んできている。また、感光剤（レジスト）の改善、あるいは位相シフトマスクや斜光照明などの RETs (resolution enhancement techniques) の適用により、プロセスファクターの低減が進んできた。最先端の ArF 露光装置では、露光波長 193 nm（フッ化アルゴンエキシマレーザー、ArF）、NA 0.92、プロセスファクター 0.3 以下を達成し、半周期 60 nm 以下のパターンニングが実現しつつある。ところが、ここにきて、さらなる短波長化が光リソグラフィーの現実解としてなかなか実現できない状況に陥っている。そのような中、液浸投影レンズによる NA の向上が提案されている^{2,3)}。

一方、焦点深度（depth of focus: DOF）は、

(株)ニコン精機カンパニー開発本部光学設計部 (〒360-8559 熊谷市大字御稜威ヶ原 201-9) E-mail: Matsuyama.Tomoyuki@nikonoa.net

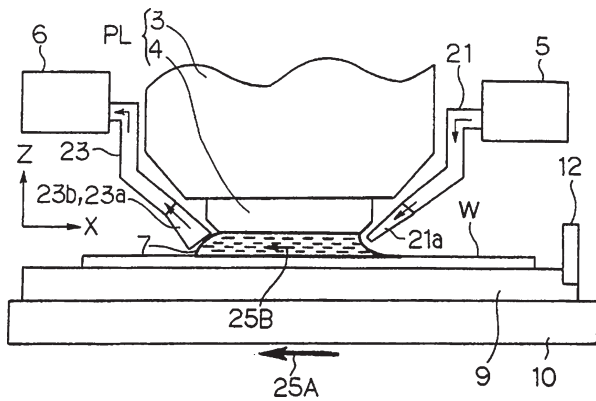


図1 局所液浸方式⁴⁾。

$$DOF = k_2 \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{n} \right) \left(\frac{1}{1 - \cos \theta} \right) \quad (2)$$

で表現できる。ここで、 n は像界の屈折率、 λ は露光波長、 θ は最大 NA の光線と光軸のなす角、 k_2 は定数（第 2 プロセスファクター）である。同じ NA であれば、液浸投影レンズのほうが乾燥投影レンズよりも、焦点深度は深くなる。例えば、露光波長が 193 nm (ArF)、NA が 0.85、液浸媒質が純水（193 nm での屈折率 1.44）の場合、空气中 $\theta = 58.2^\circ$ に対し純水中では $\theta = 36.2^\circ$ となり、式 (2) に従えば、液浸投影レンズの DOF は乾燥投影レンズの DOF に比べて約 1.7 倍の拡大となる。

2. 液浸手法

液浸手法に関してはいろいろな方法が提案されている^{1,4,5)}が、実露光機に採用されるのは図1に示す局所液浸方式で、液層の厚さは数 mm である。この方式によれば、液浸露光機であっても、乾燥露光装置とほぼ同等な生産性（スループット）が期待できる。

3. 液浸投影レンズ試験機の開発

筆者らは、製品開発に先立ち液浸露光装置実験機を開発したので、その概要について報告する。本実験機に搭載されている投影レンズは、乾燥露光装置の投影レンズをできるだけ少ない改造で液浸レンズ化したものである。

3.1 液浸波面収差測定

投影光学系の波面収差測定において往復光路による干渉計測を用いている。像点に相当する点を曲率中心にもつ球面鏡を像界に配して、光を折り返している。液浸実験機用投影レンズの波面収差計測にあたって、乾燥投影レンズ用の波面収差測定器を改造し、液層を介して測定を行う新しい方式を採用した。この方式においては、浸液そのものの光学的特性を制御することが、液浸波面収差測定器に課された最大の課題である。具体的には、不純物の除去、奪気による泡の発生の抑制、高精度温度制御が必要となった。

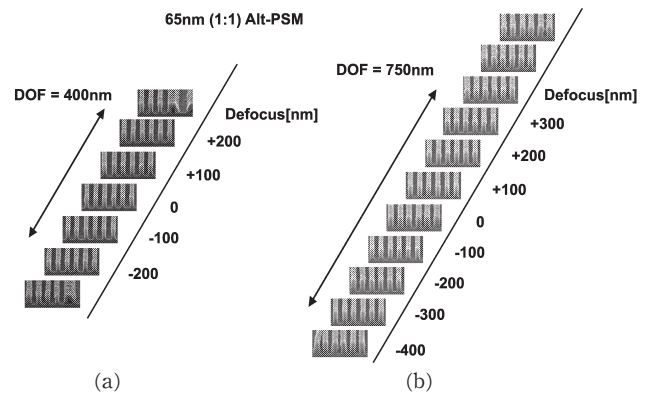


図2 液浸実験機 (ArF 0.85 NA) による露光結果と乾燥露光機による露光結果の比較 (東京応化工業株式会社の協力による)。(a) 乾燥投影レンズ (0.85 NA) による露光結果、(b) 液浸投影レンズ (0.85 NA) による露光結果。

そのため、奪気純水製造装置および温度制御装置を波面収差測定器に付加して対応した。温度に関しては、 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下の制御を行った。本装置による波面収差計測結果をもとに投影レンズの光学調整を行い、同じ NA の乾燥投影レンズとほぼ同等な収差性能（いずれも像面スリット内で、波面収差最大値 2.3 nm RMS、ディストーション最大値 3.4 nm、総合焦点差 48 nm）をもつ液浸実験レンズが完成した。

3.2 露光実験結果

図2に、本液浸実験投影レンズによる、渋谷・レベンソン型位相シフトマスク (alt-PSM) を使った露光結果を示す。比較のため、同一条件での乾燥投影レンズによる露光結果も合わせて示す。液浸化による焦点深度の改善が明らかに認められ、その比率も式 (2) による予測値とほぼ一致する。

4. 直線偏光結像

従来露光機の照明系は、実質的に非偏光な照明光を提供することを理想としている。非偏光結像の場合、1 に近い高 NA になってくると、いわゆるベクトル効果による像コントラストの低下が懸念される。物体の空間周波数をレンズ NA で規格化して考えた場合、高 NA になるほど像のコントラストが低下するという問題が発生する⁶⁾。そこで考えられたのが、直線偏光 (s 偏光) 照明である。光源の偏光状態が s 偏光 (物体を格子とみなしたときに、電気ベクトルの方向が格子の溝と平行な直線偏光) であれば、いくら高 NA になってもベクトル効果によるコントラスト低下が発生することがなく、液浸化の本来の目的である解像力の向上が効果的に実現できる。

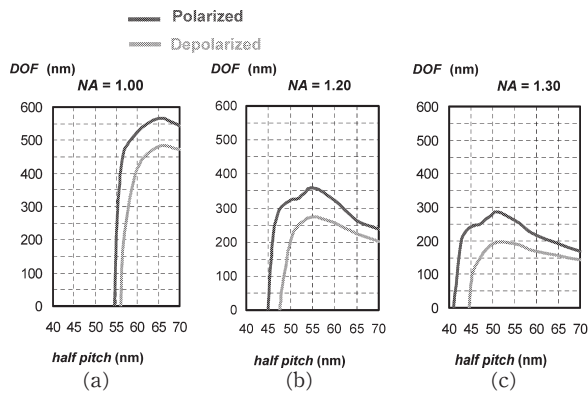


図3 E-D tree 空間像シミュレーションによる、直線偏光 (s 偏光) 照明の効果。レジスト内空間像のシミュレーション：レジスト屈折率 $n=1.70$, Attn-PSM (6%), 二極照明, 最大 $\sigma=0.95$, dipole $\sigma=0.19$ (各極の σ)。

4.1 直線偏光照明の効果

exposure-defocus tree (E-D tree)⁷⁾ 空間像シミュレーションによる、二極照明における直線偏光 (s 偏光) の効果を図3に示す。焦点深度は理想線幅に対して $\pm 10\%$ の線幅誤差を許容した場合のものであり、露光量誤差 $\pm 3\%$ 、物体線幅誤差 $\pm 3\%$ を仮定している。シミュレーション結果から、直線偏光照明による、解像力改善効果、焦点深度改善効果が明らかである。

4.2 実験結果

NA 0.85 の ArF 露光機による二極照明における直線偏光露光実験を行った。本露光機は、偏光の状態を表すストークスパラメーターの S_1/S_0 の絶対値が、光源像全体の平均値で 0.7 以上の s 偏光照明を実現した。その状態での露光結果から作製した E-D tree と、シミュレーションによる E-D tree を図4に示す。本実験結果により、シミュレーションとほぼ同等な焦点深度の改善効果、あるいは露光量余裕度 (dose latitude) の改善効果が確認できた。

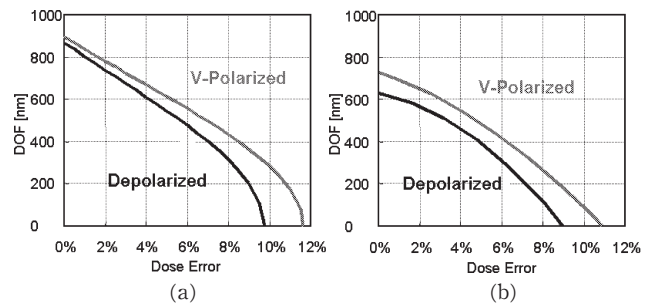


図4 s 偏光 (s-polarized) 二極照明による 70 nm 密集線パターン E-D tree. (a) シミュレーション結果, (b) 実露光実験結果. シミュレーションにおいては、マスク線幅誤差： $\pm 1.0\%$ 、線幅誤差許容値：基準値 $\pm 5\%$ を仮定。

5. 今後の展望

これまでの液浸露光実験機による、実験結果は、液浸露光機が近い将来の半導体開発のための最も確実な解であることを確認するものである。光学設計者、技術者が引き続き最先端光リソグラフィーの分野で活躍できることを期待する。

文 献

- 1) S. Owa and H. Nagasaka: "Advantage and feasibility of immersion lithography," J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst., **3** (2002) 97-103.
- 2) M. Switkes and M. Rothschild: "Resolution enhancement of 157 nm lithography by liquid immersion," J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst., **1** (2002) 225-228.
- 3) 牛田一雄, 諏訪恭一: 特開平 10-303114 (1998).
- 4) Y. Fukami and N. Magome: PCT/JP99/1262 (1999) WO99/49504.
- 5) B. J. Lin: "Semiconductor foundry, lithography, and partners," Proc. SPIE, **4688** (2002) 11-24.
- 6) T. A. Brunner, N. Seong, W. D. Hinsberg, J. A. Houle and M. I. Sanchez: "High NA lithographic imagery at Brewster's angle," J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst., **1** (2002) 188-196.
- 7) B. J. Lin: "The exposure-defocus forest," Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 6756-6764.

(2004年10月12日受理)